

Title	磁気共鳴II(電子スピン共鳴とs-d相互作用)(物性研「稀薄合金におけるs-d相互作用」研究会)
Author(s)	伊達, 宗行
Citation	物性研究 (1969), 11(5): 381-385
Issue Date	1969-02-20
URL	<a href="http://hdl.handle.net/2433/86814">http://hdl.handle.net/2433/86814</a>
Right	
Type	Departmental Bulletin Paper
Textversion	publisher

## 磁 気 共 鳴 II

### (電子スピン共鳴と $s-d$ 相互作用)

阪大理 伊 達 宗 行

#### 1. はじめに

いわゆる RKKY 相互作用が確立されるまでの数年間を含めると、 $s-d$  相互作用研究の歴史は既に 15 年近くなるが、この間に電子スピン共鳴が本質の理解に決定的な役割を果たした場面がどのくらいあったか？ とふりかえって見ると、それは意外に少いことがわかる。初期の Cu-Mn 希薄合金の ESR<sup>(1)</sup>などは明かにかなりの成果をあげているが、たとえば Kondo 効果を得ていないといえる。少くともイオン結晶や半導体で示された過去の見事な成果を思い起してみると大へんに物足らない。ESR はたしかに切れ味のよい測定手段ではあるし、ミクロな知識を端的に反映してくれる有力な方法である。しかしこれも有効な使い方をしないと電気抵抗とか比熱等の素朴なデータに及ばないことになる。

金属ではまず表皮効果の存在がマイクロ波の使用を大巾に制限する。しかし ESR から見ると希薄合金の  $s-d$  相互作用の研究は超電導の研究におけるほど絶望的ではない。超電導体は磁場をも追出してしまうために ESR の条件自体が確立できず、第二種の超電導体で  $H_{C1}$  と  $H_{C2}$  の中間状態で共鳴をねらうか、あるいは critical region で normal state での共鳴を探す程度のことしか考えられそうにない。これに反して  $s-d$  相互作用を主目標とする希薄合金の研究にはまだ多くの可能性が残されている。このような現況からみてここではこれまでの成果を羅列するという方式は最小限にして、現在どんな問題点があり、将来どのような研究が必要とされるかという角度から話を進めることにする。

#### 2. これまでの成果

電子スピン共鳴はこれまでつぎのような成果をあげてきている。

(1) 伝導電子スピン共鳴の観測を通じて金属内電子状態を調べる。いくつかの流れがあるが  $Li$ ,  $Na$ ,  $K$  等のアルカリ金属をはじめとして約 10 種の金属で

伊達宗行

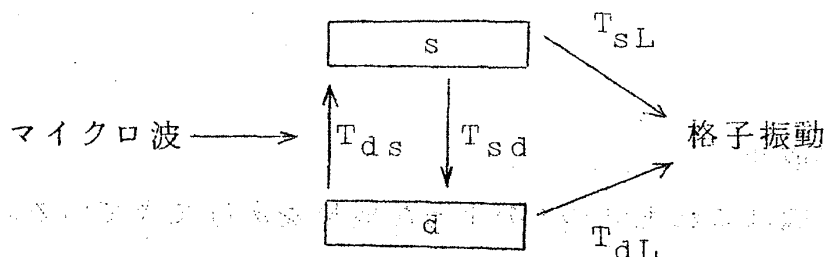
E S R (伝導電子の場合はとくに C E S R と略記する) が求められており<sup>(2)</sup>, その結果重金属に行くほどスピン軌道相互作用が大きくなり, また原子のコア偏極も効くようになって  $g$  値, 線幅 (緩和時間) が変化してくる。純粋な  $L_i$  では  $g = 2.002258$  (自由スピン:  $g = 2.002319144$ ) であるのにたとえば銅では  $g = 2.033$  であるし, 線幅も後者が非常に大きい。また non-magnetic な不純物の散乱による効果も主としてアルカリ金属でかなり精密に測定されている。当然のことながら伝導電子スピンに対する重金属の不純物散乱断面積は大きくなっている。また最近 Na, K など自由電子モデルからのズレ, すなわち Landau-Fermi liquid としての spin 相関係数がある程度まで求められるようになって来ている<sup>(3)</sup>。

## (2) 不純物スピン共鳴

いわゆる局在スピンモデルが確立しているときで, その局在スピンの共鳴を見るわけである。このときは今までの結果をまとめるとつぎの2つに分けられる。

(a) 伝導電子スピンの格子緩和時間が長いとき, この場合の特徴は  $s$  電子が局在  $d$  電子とカップルしたまま共鳴現象を起すために  $d-s$  coupled system としての resultant  $g$ -value をあたえるのを初め, 共鳴現象の一般的な性質がこのモデルで説明される。たとえばある濃度を指定すると充分低温では ( $T_K < T$  として)  $d$  電子が帯磁率の主要部分を占め, 同時に E S R は  $s$  電子 (Pauli の温度不変帯磁率を考えると) の寄与が相対的に減少して  $g$  は  $d$  電子の  $g$  に近づく<sup>(4)</sup>。しかし高温では  $d$  電子の効果はキュリーワイス的に減ってほとんど  $s$  電子だけの  $g$  値になる。

一方, 共鳴の線幅の解析から得られる各種の緩和過程をまとめるとつぎの4種の緩和時間の導入で理解できることがわかっている。



エネルギーは  $s-d$  coupled system にまづ入るが，ここでは  $s \rightleftharpoons d$  の流れを示す 2 つのパラメーターと，各々のスピン系から流れ出す各 1 つのパラメーターを導入する。これで大まかながら，基本的に現象を理解できる。一例として  $Cu-Mn$  の場合， $Mn$  が 280 ppm で  $T=4^\circ K$  のとき， $T_{ds}/T_{sd} \sim 65$  で  $T_{dL} \sim 4 \times 10^{-9}$  sec， $T_{sL} \sim 5 \times 10^{-9}$  sec と評価されている。

(a) 伝導電子スピンの緩和時間が短いとき，具体的な例は  $P_d \rightarrow G_d$  をはじめとして， $P_d$ ， $R_L$ ， $A_g$  などに  $G_d$  が入った系での ESR がこの場合にあたる。このときは不純物スピンの磁気モーメントは，伝導電子の熱的に平均化されたモーメント（ラーマー運動をしない）とカップルするが，不動の后者から受ける交換力でいわゆる exchange shift を起し，共鳴線がズレる<sup>(5)</sup>。たまたまこの効果は  $Pd$  の巨大モーメントに関連してその手さぐりをするために有効であった。

(3) non-diluted metal の局在電子スピン共鳴

$Fe$ ， $N_i$  等をはじめとして強磁性共鳴はかなり広く研究されており，また稀土類金属  $Eu$ ， $G_d$ ， $Ce$  等の常，強磁性共鳴が求められている。また helical spin resonance と思われるものも報告されている。しかしいわゆる  $s-d$  相互作用の直接的研究に寄与するものは少い。

### 3. これからの問題点

興味のもち方によってかなり見解が異なる点もあると思われるが，以下に私見をも含めた問題点を列挙し，読者の御批判や御意見をうかがいたいと思うので，なるべく問題提起の形で行くことにする。

(1)  $T_R$  附近における ESR の変化

はじめにのべたように  $T_K$  以下での電子状態の変化を反映する ESR の成果は得られていない。すでに他の方法でかなり確立されていることを ESR で今さら，という意見もあるかもしれないが，しかし一度は是非共試みるべきであろう。現在最も可能性が高いのは  $Cu-Cr$  系で，Spin-transmission resonance 法によるものである。これはかなり確実に ESR の  $T_K$  近傍での変化を探りうる対象のようである。

(2) 何故 ESR はあまり良く出ないか？

伊達宗行

これは決してテクニカルな問題だけではなく，かなりの将来性あるテーマを含んでいると思われる。それは稀薄合金でESRが観測されているのはCu-Mn系を代表例として，Cu, Ag, Mg等におけるMn, Cu中のCrなど希土類ではGd不純物以外には極めて出にくいことである。たとえばCu-Fe, Au-Vのような典型的な" $T_K$ 合金"でもESRには出ない。あまり正確ではないかもしれないが，局在性が悪いほど，また $T_K$ が高いほどESRは出ないように見える。普通このような場合にはESRでは $T_1$ が非常に短いという可能性を考えるが，しかし合金一般に対してかんたんにこうわりきるのもどうであろうか？ かりに $T_1$ の問題としてもただ $T_1$ が短いとかたづけしないで，いわゆるs-dモデルそれ自体が確立している目安を与える量の一つか $T_1$ であるというような可能性も考慮すべきであろう。金属は，ESRの立場で見ると今は丁度1948年頃，化合物を手あたり次第に調べた時代に対応するように見える。学問的にはまだ若い，といえるであろう。

### (3) Random Lattice の問題

RKKY相互作用がlong rangeであるということから不純物スピンの数かそんなに多くない場合でも局在スピン間相互作用がかなり大きい。そこでESRに限らないがすぐexchange coupled random latticeの問題が生じてくる。理論的にもこの問題は大へんむつかしいようであるが，希薄合金は少くとも実験的にrandom latticeの問題を取扱う一つの良いサンプルであるように思われる。最近我々はAg-Mnをこのような点から眺めることを試みた<sup>(6)</sup>。それは低温において見られるESRのシフトが，random lattice中にもある程度存在するshort range orderの示す現象でシフトの主因がMnの核スピン磁気異方性であることを明らかにした。実験的にはENDOR法が有効であった。これは合金におけるENDOR応用の最初のものでもある。この結果，この合金について反強磁性的なshort range orderにおけるeffective sublattice magnetizationの温度変化が具体的に測定された。理論の方の御協力をまって更に研究を進めたいと思っている。

### (4) アルカリ金属で局在モーメントを作れないか？

少しでも事情をわかりやすくする努力の一つとしてLi, Na, Kなどの金属に局在モーメントを作ることは出来ないだろうか？ という設問も现阶段では有

効のように思われる。幸いCESRでアルカリ金属は非常によく調べられているから、放射性元素でも、あるいは何らかのイオンインプランテーションでもよいから単純な金属における局在スピンの出来るかどうか調べるべきであると思われる。

#### 4. おわりに

まだ多くの過去のデータ，当面の目標，および将来の可能性について論ずる内容があるのだが紙数の点もあり割愛したい。過去のデータについては物性研の研究会レポート「稀薄合金におけるs-d相互作用」P63～93にあげてあるのでそちらを参照されたい。

#### 文 献

- (1) J.Owen et al.Phys.Rev. 102 (1956) 1501
- (2) 多くの文献があるので，上記の物性研レポートP64の表をとりあえず参照の事。
- (3) S.Schultz et al.Phys.Rev.letters 18 (1967) 283
- (4) P.Monod et al to be Published in Phys.Rev.
- (5) D.Shaltiel et al. Phys.Rev. 135 (1964) A 1346
- (6) 奥田喜一，伊達宗行，To be published in J.Phys.Soc.Japan.